

二次元回折格子構造によるプラズモニックテラヘルツ検出素子の高機能化に関する研究

著者	齋藤 琢
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	89
号	1
ページ	122-123
発行年	2020-08-31
URL	http://hdl.handle.net/10097/00129006

修士学位論文要約（令和2年3月）

二次元回折格子構造によるプラズモニク テラヘルツ検出素子の高機能化に関する研究

齋藤 琢

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：佐藤 昭

Study on Performance Improvement of the Plasmonic THz Detector by a 2D Diffraction Grating Structure

Taku SAITO

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Akira SATOU

We have developed grating-gate plasmonic THz detectors, which are promising as room-temperature-operating, sensitive, high-speed THz detectors. In a conventional way, the photovoltage generated in a detector channel is output from the drain electrode. In this case, the photovoltage is proportional to the channel length only and is independent of the channel width, resulting in the output signal not proportional to the active area size. In this study, we proposed the use of the gate electrode, instead of the drain electrode, in a plasmonic THz detector as a readout port in the case of pulsed or modulated incoming THz waves. We theoretically investigated that the principle of the gate-electrode readout and revealed its superiority over the drain-electrode readout. Also, we experimentally showed that the gate electrode of a grating-gate plasmonic THz detector works as a readout port.

1. はじめに

テラヘルツ電磁波（以下 THz 波）は、電波と光波の中間の周波数帯に位置しており、電波としては超高周波であることから、高速大容量高速無線への応用が期待されている。しかしながら、「室温動作、高検出感度、高速応答、オンチップ化可能」といった、通信に要求される水準を全て満たす THz 検出素子は未だ開発途上となっている。

このような状況を打破すべく、電子集群の集団振動量子であるプラズモンを動作原理としたプラズモニクテラヘルツ検出素子の研究が進んでいる[1]。筆者らのグループは、InP 系 HEMT をベースとした格子ゲート構造プラズモニクテラヘルツ検出素子による高感度検出を報告している[2]。通常、同素子のアクティブ領域は、入射 THz 波のスポット面積(1 mm²以上)より遥かに小さい。検出素子の受光効率を高めるにはアクティブ領域面積の拡大が有効である。しかしながら、後述のように従来のドレイン電極から出力信号を取り出しの場合、出力信号はチャンネル長方向にのみ比例し、チャンネル幅方向に依存しないため、その出力増大効果は限定的であった。

そこで本研究では、テラヘルツ無線通信への応用に向け、格子ゲート構造プラズモニクテラヘルツ検出素子の検出感度の向上を目的とし、従来のドレイン電極に代わりゲート電極を出力ポートとする方式の理論的検討と実験的検証を行った。

2. ゲート電極出力に関する理論的検討

まず、従来のドレイン電極を出力ポートとする方式について述べる。格子ゲート構造プラズモニクテラヘルツ検出素子は、図1に示すようにゲート電極と金属ナノアンテナを周期上に配置し回折格子構造を形成している[3]。従来方式ではゲート電極に閾値電圧を印加することで、空乏領域とプラズモニク共振器領域を周期的に形成している。THz 波が入射されると、共振器に二次元プラズモンが励起され、その流体非線形性によって光整流電流が生成される。光整流電流はゲート直下の高抵抗な空乏領域に流れ込み光起電圧に変換される。周期構造は縦続接続されているため、ドレイン電極からの出力電圧は各周期構造で生成された光起電圧を重畳したものとなり、チャンネル長に比例して増加する。しかし、チャンネル幅に対しては、光電流は比例して増加するが、空乏領域の抵抗は反比例して減少するため、出力電圧はチャンネル幅に依存しない。また、この従来方式では空乏領域を形成するため、出力インピーダンスは高くなっている。

次に、ゲート電極を出力ポートとする方式の出力原理を述べる。ここでは、チャンネルゲート間のバリア層を通して流れる電子電流は無視できるとする。その場合、出力信号の交流成分のみがゲート電極から出力される。図1に示すように、プラズモニク共振器領域で生成された光電流 $dj_{pl} \times W_{ch}$ はゲート直下の領域に流れ込み、電荷の時間変化 $(dAq_{pl}/dt) \times W_{ch}$

をもたらし、各周期のゲートフィンガーには逆符号の電荷誘起による変位電流 $-(d\Delta q_{pl}/dt) \times W_{ch}$ が流れる。各周期で生成された電流はゲートフィンガーを束ねる電極パッドで合流し足し合わされるため、ゲート電極に出力される光電流は

$$\Delta J_{total} = (L_{ch}/L_{unit}) \times [-(d\Delta q_{pl}/dt) \times W_{ch}] \\ \propto L_{ch} W_{ch}$$

となる。上式から、出力光電流はチャネル長とチャネル幅の両方に比例する。この出力光電流は外部負荷によって光電圧に変換される。よって、ゲート電極出力の場合はアクティブ領域面積の増大に比例した検出感度向上が見込まれる。また、出力インピーダンスはゲート電極抵抗とチャネルゲート間容量の直列接続となる。外部負荷とのインピーダンス整合を考えると、格子ゲートフィンガーにおける抵抗は 50 Ω より小さいため、整合回路の導入によるインピーダンス整合実現が可能である。

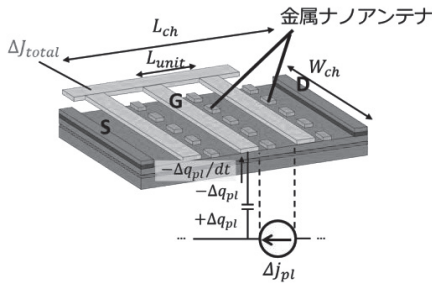


図 1 ゲート電極からの出力信号取り出しの模式図。

3. THz パルス検出測定によるゲート電極出力の検証

実デバイスでゲート電極が出力ポートとして機能するかどうかを実験的に検証するため、格子ゲート構造プラズモニックテラヘルツ検出素子を試作し THz パルス光の検出実験を行った。図 2 に測定に用いた素子の SEM 像を示す。続いて、本検出素子に中心周波数 0.8 THz の THz 疑似連続光パルスを照射し、出力信号をオシロスコープにて測定した。またその偏波は、偏光子によりゲートフィンガーに対して垂直な方向に設定した。ゲート電極出力測定の際はドレイン電圧、ゲート電圧共に無印加とした。ドレイン電極出力測定の場合は、ドレイン電圧無印加、ゲート電極にソースメーターを用いてゲート電圧 $V_g = -0.4$ V 印加のもと行った。

図 3(a)、(b)に、ドレイン電極、ゲート電極を出力ポートとした場合の出力電圧波形をそれぞれ示す。図 3(a)より、使用した検出素子はプラズモニックテラヘルツ検出素子として動作していることが分かり、図 3 (b)より、ゲート電極が出力ポートとして動作していることが分かる。測定波形の後縁を比較すると、ゲート電極からの出力の方がインピーダンス不整合による信

号の多重反射による波形歪みが小さくっており、波形劣化が大きく改善している。また前述のように、出力インピーダンスが大きく異なるにも関わらず、その振幅はドレイン電極からの出力と同程度となっている。この結果から、インピーダンスを整合した際にドレイン電極と比較して、出力が増大すると考えられる。

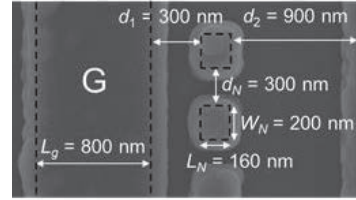


図 2 格子ゲート構造プラズモニックテラヘルツ検出素子の SEM 像(破線は SiN パッシベーション膜下のゲートおよび金属ナノアンテナの予想位置)。

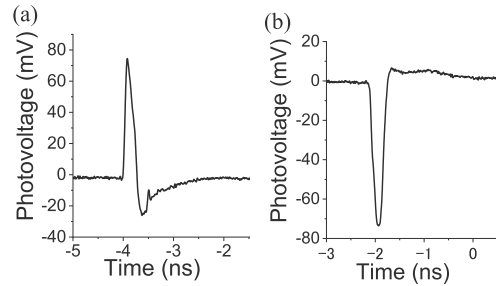


図 3 (a) ドレイン電極、(b)ゲート電極から出力された格子ゲート構造プラズモニックテラヘルツ検出素子の出力電圧波形。

4. まとめ

格子ゲート構造プラズモニックテラヘルツ検出素子の検出感度向上を目的として、従来のドレイン電極を出力ポートとして使用する方式に代わる、ゲート電極を出力ポートとする方式を提案した。ドレイン電極出力では出力信号がチャネル長のみに比例する一方で、ゲート電極出力では出力信号がチャネル長とチャネル幅の両方に比例して増大することを理論的に示した。また、格子ゲート構造プラズモニックテラヘルツ検出素子を用いて、THz 波検出実験を行い、ゲート電極が出力ポートとして機能することを実験的に示すとともに、ドレイン電極出力と比較してインピーダンス不整合による信号歪みが改善していることを確認した。これらの結果から、インピーダンス整合実現による出力増大の見通しが得られた。

文献

- [1] M. Dyakonov and M. Shur, Phys. Rev. Lett., 71 (1993) 2465.
- [2] Y. Kurita et al., Appl. Phys. Lett., 104 (2014) 251114.
- [3] M. Suzuki et al., IRMMW-THz 2018, Tu-A2-1a-2 (2018).